

①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND

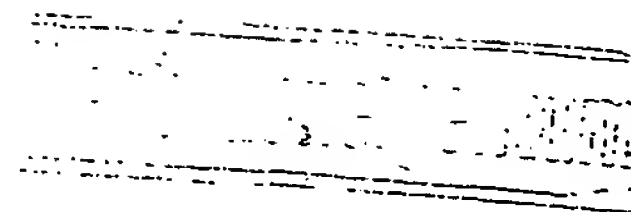


DEUTSCHES  
PATENTAMT

①⑫ Patentschrift  
①⑪ DE 37 00 633 C 1

⑤① Int. Cl. 4:  
C 23 C 14/32  
C 23 C 16/50

②① Aktenzeichen: P 37 00 633.9-45  
②② Anmeldetag: 12. 1. 87  
④③ Offenlegungstag: —  
④⑤ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 26. 5. 88



DE 37 00 633 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:  
Grün, Reinar, Dr., 4630 Bochum, DE

⑦② Erfinder:  
gleich Patentinhaber

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE-AS	30 10 314
DE-OS	35 13 014
DE-OS	33 26 020
GB	21 55 862
GB	21 55 496
GB	12 55 321
US	45 00 563
EP	00 62 550 A1

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zum schonenden Beschichten elektrisch leitender Gegenstände mittels Plasma

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum schonenden Beschichten von elektrisch leitenden Gegenständen mittels ionisierter Dämpfe aus einem durch Glimmentladung erzeugten Plasma, wobei eine Zufuhr von elektrischer Energie ins Plasma durch periodisch wiederholte Impulse erfolgt. Dadurch wird erreicht, daß die zu beschichtenden Teile einer, in weiten Bereichen dosierbaren Ionenstrom- bzw. Temperaturbelastung ausgesetzt sind. Durch Überlagerung von gepulsten und ungepulsten Magnetfeldern ist die Beschichtung zusätzlich zu beeinflussen.

DE 37 00 633 C 1

BEST AVAILABLE COPY

## Patentansprüche

1. Verfahren zum schonenden Beschichten elektrisch leitender Gegenstände nach PVD-Verfahren mittels ionisierter Dämpfe aus dem Gleichspannungsplasma einer Glimmentladung, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Zufuhr elektrischer Energie mit periodisch wiederholten Gleichstromimpulsen durchgeführt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Impulse mit einer Spannung von mehr als 100 V, insbesondere zwischen 200 und 800 V, verwendet werden.
3. Verfahren nach den Ansprüchen 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Impulsstrom mit einer Stromdichte von 0.1 mA/cm<sup>2</sup> bis 1 A/cm<sup>2</sup>, insbesondere 0.5 mA/cm<sup>2</sup> am Werkstück eingesetzt wird.
4. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß Impulse mit einer Energiedichte von 1 bis 900 W/cm<sup>2</sup>, insbesondere 30 W/cm<sup>2</sup>, eingesetzt werden.
5. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß Impulsdauern zwischen 10 und 1000 µs, insbesondere 30 bis 200 µs, eingesetzt werden.
6. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß für die energiefreie Zeitspanne zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen zwischen 10 und 1000 µs, insbesondere 30 bis 200 µs, benutzt werden.
7. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß für die mittlere Plasmaenergiedichte Werte zwischen 50 mW/cm<sup>2</sup> und 5 W/cm<sup>2</sup> benutzt werden.
8. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß bei Drücken von weniger als 100 Pa, insbesondere bei 0.1 bis 1 Pa beschichtet wird.
9. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß dem Plasma ein äußeres Magnetfeld überlagert wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß ein Impulsmagnetfeld benutzt wird.
11. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß die Stromimpulse zum Aufbau von Plasma und Magnetfeld synchronisiert werden.
12. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetfeldrichtung synchron umgekehrt wird.
13. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß in das Plasma von außen Wärme eingestrahlt wird.
14. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß das Beschichtungsverfahren mittels Prozeßrechner gesteuert wird.
15. Verfahren nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß eine Lichtbogenentladung im Plasma automatisch erkannt und innerhalb von weniger als 10 µs die Impulse selbsttätig abgeschaltet werden.
16. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 15 mit einer Vakuumkammer, in der das zu beschichtende Werkstück, eine Verdampferquelle sowie Anode und Kathode zur Glimmentladungserzeugung mit Verbindungen zu einer elektrischen Ener-

giequelle angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß die Energiequelle eine Impulsstromquelle ist.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Impulsstromquelle einen Leistungsausgang, insbesondere aus Transistoren, mit einer Ausgangsspannung von mehr als 100 V, insbesondere 200 bis 800 V, und einer Schaltzeit von weniger als 5 µs aufweist.

18. Vorrichtung nach den Ansprüchen 16 und 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Stromquelle eine Steuerung mit einer Lichtbogensensorschaltung aufweist.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtbogensensorschaltung eine Wirkverbindung zur Stromquelle aufweist.

20. Vorrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß sie ein Magnetron, insbesondere ein planares Magnetron mit Impulsstromversorgung, aufweist.

21. Vorrichtung nach den Ansprüchen 16 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Wandung der Vakuumkammer beheizbar ausgebildet ist.

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum schonenden Beschichten mittels Plasma und eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Zur Beschichtung von Gegenständen sind Verfahren bekannt, bei denen das Material zum Beschichten aus der Dampfphase auf dem Werkstück abgeschieden wird. Zur Verminderung der Temperaturbelastung durch die auf der Oberfläche des Werkstückes kondensierenden Dämpfe, bei denen die Kondensationswärme frei wird, verdampft man das Schichtmaterial im Vakuum. Die unter der Abkürzung PVD (Physical Vapor Deposition) zusammengefaßten Verfahren zur Beschichtung von Werkstücken unterscheiden sich u.a. durch die unterschiedliche Erzeugung des Dampfes. Die Eigenschaften der Beschichtung lassen sich wesentlich verbessern, wenn die Beschichtung aus einem Plasmazustand erfolgt. Der ionisierte Dampf kann dann durch äußere magnetische oder elektrische Felder auf das zu beschichtende Werkstück beschleunigt werden. Dadurch kann die Aufdampftrate vorteilhaft erhöht werden.

Die aus einem Plasma abscheidenden Anlagen verursachen unerwünschte hohe Temperaturbelastungen von Werkstück und Schicht durch die hohe kinetische Energie der einfallenden Teilchen. Diese hohe Energie führt auch dazu, daß die Teilchen aus der gerade abgeschiedenen Schicht wieder abgetragen werden. Diesen Nachteil nutzt ein in DE-PS 22 03 80 beschriebenes Verfahren soweit, daß es die Schicht so lange wachsen läßt, bis die Abtragsrate gleich der Aufwachsgeschwindigkeit ist und damit Schichten gleicher Dicke unabhängig von der Prozeßdauer herstellbar sind.

In der Mehrzahl der Anwendungsfälle möchte man jedoch ein möglichst hohes Schichtwachstum erzielen, so daß für diese Anwendungsfälle der Abtrag durch auftreffende Teilchen und eine ungleichmäßige thermische Belastung nachteilig wirken. Die nachteiligen Veränderungen der Werkstückoberfläche durch die einfallenden Ionen bestehen z. B. aus einer Aufrauhung der Oberfläche oder im Eindringen und der Erzeugung von Fehlstellen sowie im Auftreten von vorübergehenden elektrischen Ladungen auf der Werkstückoberfläche.

Die hohe Stoßzahl von größenordnungsmäßig  $10^{17}$  Teilchen pro  $\text{cm}^2$  und Sekunde führt zu einer hohen Bereitschaft für chemische Reaktionen. In manchen Fällen muß daher mit einem starken Fremdstoffeinbau, d.h. von anderen Stoffen in den erzeugten Schichten, gerechnet werden. Außerdem können starke Temperaturänderungen des Werkstückes und der Schicht durch die hohe kinetische Energie der einfallenden Teilchen bewirkt werden.

Die in den bekannten Anlagen genutzten Plasmen werden überwiegend durch elektrische Entladungen erzeugt. Diese Entladungen bestehen aus zwei stromführenden Elektroden, zwischen denen beim Zünden der Entladung das verdampfte, gasförmige Material zwischen den Elektroden in den Plasmazustand überführt wird. Zwar gewährleistet der Stromfluß durch das Plasma dann die Aufrechterhaltung des Plasmazustandes, andererseits führt die zur Aufrechterhaltung des Plasmazustandes eingespeiste elektrische Energie zu einer hohen Temperaturbelastung des Ofens und der Werkstücke. Die Ofenwandung sowie die zu beschichtenden Werkstücke müssen im allgemeinen gekühlt werden. Bei Beschichtung unterschiedlicher Gegenstände können diejenigen Gegenstände mit einer größeren Oberfläche zu Volumen Verhältnis leicht überhitzt werden. Die Folge ist eine nachteilig hohe Ausschußquote oder aber höhere Betriebskosten, da nur gleichartige Werkstücke in einer Charge behandelt werden können. Das Temperaturgefälle zwischen hoher innerer Ofentemperatur und gekühlter Wandung, die zur Abführung der überschüssigen Leistung notwendig ist, führt zu unterschiedlichen lokalen Abscheidebedingungen im Ofen. Die Folge sind qualitativ unterschiedliche Schichten.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren anzugeben, das die Nachteile bekannter Verfahren vermeidet und sich stattdessen durch geringere Betriebskosten, geringere Ausschußquoten, höhere Qualität und verbesserte Prozeßführungsbedingungen beim Beschichten mittels ionisierter Dämpfe auszeichnet.

Die Aufgabe wurde dadurch gelöst, daß eine Zufuhr von elektrischer Energie ins Plasma durch periodisch wiederholte Impulse erfolgt. Diese Verfahrensweise erlaubt eine vorteilhaft schonende Beschichtung von Gegenständen, da sie erfindungsgemäß nur noch überraschend geringen Temperaturen ausgesetzt werden. Gleichzeitig verringern sich die Betriebskosten und Ausschußquoten vorteilhaft.

In Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß die Impulse eine Spannung von mehr als 100 V, insbesondere zwischen 200 und 800 V aufweisen. Die Impulse vermögen innerhalb der Vakuumkammer ein Plasma aufrecht zu erhalten, das einerseits die Gefahren zur Bildung von Lichtbögen weitgehend ausschließt und andererseits aber auch ein wirksames Beschichten von Gegenständen erlaubt. Mit Hilfe derartiger Impulse können sogar Oberflächenstrukturen von Gegenständen beschichtet werden, die sogar in Längen zu Durchmesser Verhältnis von größer als eins z.B. bei Bohrungen aufweisen.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß die Impulse einen Strom aufweisen, der einer Stromdichte im Werkstück zwischen  $0.1 \text{ mA/cm}^2$  Werkstückoberfläche bis  $1 \text{ A/cm}^2$ , insbesondere  $0.5 \text{ mA/cm}^2$  aufweisen. Stromdichten dieser Größenordnungen führen zu hervorragend hohen Wachstumsgeschwindigkeiten der Schichten bei wesentlich geringerem Aufwand an elektrischer Energie.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgese-

hen, daß die Impulse eine Energie aufweisen, deren Dichte während der Dauer eines Impulses zwischen 1 W und  $900 \text{ W/cm}^2$ , insbesondere  $30 \text{ W/cm}^2$  entspricht. Durch die hervorragend weite Spanne, in der die Energiedichte einstellbar ist, können Gegenstände auch mit sehr unterschiedlichen Geometrien beschichtet werden.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß Impulse jeweils eine Dauer zwischen 10 bis  $1000 \mu\text{s}$ , bevorzugt zwischen 30 und  $200 \mu\text{s}$  keine Energiezufuhr erfolgt. Als praktisch interessante Bereiche haben sich diese Spannen herausgestellt, wobei die engeren Bereiche eine besonders sichere und wirtschaftlich vorteilhafte Betriebsweise erlauben.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß eine mittlere Energiedichte des Plasmas zwischen  $50 \text{ mW/cm}^2$  bis  $5 \text{ W/cm}^2$  frei wählbar ist. Das Verfahren läßt sich damit an sehr unterschiedlich ausgebildete Gegenstände anpassen, wobei eine nachteilige Überhitzung der Gegenstände oder einzelner Teile davon weitgehend vermieden werden kann.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß die Beschichtung bei einem Druck von weniger als 100 Pa zwischen 0.1 bis 1 Pa erfolgt. Das Verfahren läßt sich bei ungewöhnlich hohem Druck durchführen, so daß an die Vakuumkammer keine besonders hohen Anforderungen zu stellen sind. Besonders günstige Wachstumsverhältnisse für Beschichtungen lassen sich jedoch im angegebenen niedrigeren Druckbereich erzielen.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß dem Plasma ein äußeres Magnetfeld überlagert wird, insbesondere impulsweise aufgebautes Magnetfeld. Hierdurch wird eine weitere Erhöhung der Wachstumsgeschwindigkeit der Schicht erreicht. Das Pulsen des Magnetfeldes führt zu einer vorteilhaften Verringerung des Energiebedarfs.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß eine Synchronisierung der Stromimpulse des Plasmas und der Stromimpulse zum Aufbau des Magnetfeldes erfolgt, insbesondere daß das Magnetfeld in seiner Richtung synchron umkehrbar ist. Diese Ausgestaltung dispergiert vorteilhaft die Dampf-atome, wodurch auch besonders schwierig zu beschichtende Gegenstandsformen behandelt werden können.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß eine Wärmeeinstrahlung ins Plasma von außen erfolgt. Zur Unterstützung von chemischen Reaktionen im Ofen oder zur Unterstützung von Diffusionsvorgängen kann die Temperatur durch diese Ausgestaltung besonders genau auf die gewünschte Temperatur eingestellt und eingehalten werden.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß der Impuls ein Gleichstromimpuls ist. Dadurch läßt sich das Plasma besonders kontrolliert einstellen und der Materialtransport in weiten Bereichen beeinflussen.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß eine automatische Steuerung des Verfahrens mittels eines Prozeßrechners erfolgt. Die zur Prozeßführung einer bestimmten Charge als optimal ermittelten Parameter lassen sich vorteilhaft reproduzierbar mit Hilfe des Prozeßrechners abspeichern und wiederholt bei gleichartigen Chargen zur automatisierten Prozeßführung nutzen.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß das Verfahren bei PVD-Verfahren, insbesondere beim Ionenbeschichten, beim Lichtbogenverdampfen oder bei Zerstäubungsanlagen angewendet wird. Bei



derartigen Verfahren, die bisher eine hohe thermische Belastung der zu beschichtenden Gegenstände zur Folge hatten, läßt sich das erfindungsgemäße Verfahren besonders vorteilhaft anwenden, da es die Gegenstände schonender beschichtet.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß eine automatische Erkennung einer Lichtbogenentladung im Plasma erfolgt, wobei eine selbsttätige Abschaltung des Impulses in einer Zeit von weniger als 10  $\mu$ s stattfindet. Sogar das ungewollte Auftreten einer Lichtbogenentladung führt erfindungsgemäß nicht mehr zur nachteiligen Schädigung einer zuvor aufgetragenen Schicht. Bevor sich die Wirkung eines Lichtbogens ausbilden kann, wird die Energiezufuhr vorteilhaft abgeschaltet.

Zur Durchführung des Verfahrens ist eine Vorrichtung vorgesehen, bestehend aus einer Vakuumkammer, in der ein zu beschichtendes Werkstück und eine Verdampferquelle sowie eine Anode und eine Kathode zur Erzeugung einer Glimmentladung mit Verbindungen zu einer elektrischen Energiequelle angeordnet sind, z.B. in Form einer Ionenbeschichtungs- oder Sputteranlage, wobei erfindungsgemäß vorgesehen ist, daß die Energiequelle als Impulsstromquelle ausgebildet ist. Dadurch läßt sich der Energieverbrauch der Gesamtanlage wesentlich verringern und die sonst erforderlichen Kühleinrichtungen kleiner auslegen bzw. ganz ersparen.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß die Impulsstromquelle einen Leistungsausgang aufweist, der insbesondere aus Transistoren aufgebaut ist, mit einer Ausgangsspannung von mehr als 100 V, insbesondere 200 bis 800 V ausgebildet ist und eine Schaltzeit von weniger als 5  $\mu$ s aufweist. Die Transistoren bieten besonders günstige Schaltzeiten bei hohen Spannungen, so daß vorteilhaft günstige Impulsformen erreichbar sind, die einer Rechteckform weitgehend angenähert sind und eine präzise Prozeßführung erlauben.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß die Stromquelle eine Steuerung mit einer Lichtbogensensorschaltung aufweist und daß die Lichtbogensensorschaltung eine Wirkverbindung zur Stromquelle aufweist, um diese beim Auftreten von Lichtbögen abzuschalten. Dadurch wird der Betrieb der Anlage sicherer und die Ausschußquote weiter günstig beeinflußt.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß die Anlage ein Magnetron, insbesondere ein planares Magnetron, aufweist, das mit einer Impulsstromversorgung ausgerüstet ist. So kann bei relativ geringem Leistungsbedarf ein hohes Schichtwachstum erreicht werden.

In weiterer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß die Wand der Vakuumkammer beheizbar ausgebildet ist. Dadurch lassen sich die Wachstumsbedingungen besonders genau und gleichmäßig einstellen. Auch Gegenstände mit unterschiedlich ausgebildeten Oberflächen/Volumen-Verhältnis lassen sich in gleicher Charge beschichten.

Die Erfindung wird in Zeichnungen beschrieben, woraus weitere vorteilhafte Einzelheiten zu entnehmen sind.

Die Zeichnungen zeigen im einzelnen:

Fig. 1 bis 3 die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens bei verschiedenen Beschichtungsprozessen, insbesondere Fig. 1 bei der Zerstäubung (sputtering),

Fig. 2 bei der Ionenbeschichtung (ion plating),

Fig. 3 bei der Lichtbogenverdampfung,

Fig. 4 die Spannungs-Stromdichte-Kennlinie einer

Glimmentladung

Fig. 5 die Leistungscharakteristik eines Plasmas

Fig. 6 eine Gegenüberstellung von Werkstückchargen bei bekanntem und erfindungsgemäßigem Verfahren.

Fig. 1 zeigt schematisch eine Beschichtungsanlage, die nach dem Prinzip der Zerstäubung arbeitet, ein auch unter dem Begriff "Sputtern" bekanntes Verfahren. Der Beschichtungsvorgang findet in einer mit 1 bezeichneten Vakuumkammer statt, die über einen Rohrleitungsanschluß 2 mit einer Vakuumpumpe verbunden ist. Beim Zerstäuben wird die Oberfläche eines als Kathode geschalteten Ziels, das aus dem Beschichtungsmaterial besteht, mit energiereichen Ionen beschossen. Die Energiedichte beträgt dabei etwa 3 W/cm<sup>2</sup> und der Gasdruck einige Pa. Das plasmabildende Gas wird über den Rohranschluß 6 in die Kammer 1 gelassen. Mit 4 ist eine Abschirmung hinter dem Ziel 3 bezeichnet. Zur Beschleunigung der Ionen auf das Ziel, wo durch den Ionenstoß das Beschichtungsmaterial aus dem Ziel herausgelöst wird, dient die zwischen den Anschlüssen 7 und 8 angelegte Spannung, die von der erfindungsgemäßen Impulsspannungsquelle 9 erzeugt wird.

Fig. 2 zeigt den Einsatz der erfindungsgemäßen Impulsspannungsquelle 9 bei der Ionenbeschichtung (Ion Plating). Funktional vergleichbare Anlagenteile sind wie in Fig. 1 bezeichnet. Bei der Ionenbeschichtung ist das Werkstück 5 als Kathode geschaltet. Hinter ihm befindet sich die Abschirmung 4. Die über Rohranschluß 2 evakuierbare Vakuumkammer 1 kann über den Füllrohranschluß 6 mit Gas befüllt werden. Des weiteren befindet sich eine mit der Anode 10 verbundene Verdampferquelle 11. Zwischen der Anode 10 und dem Werkstück 5 wird ein Glimmentladungsplasma 12 erzeugt, das von der erfindungsgemäßen Impulsspannungsquelle 9 aufrechterhalten wird. Die Dampferzeugung erfolgt mit Hilfe der Verdampferquelle 11 in Anwesenheit des Glimmentladungsplasmas 12, wobei von dem als Kathode geschalteten Werkstück beim Beschichten durch die energiereichen Ionen die aufgewachsene Schicht teilweise mit geringerer Rate wieder abgestäubt wird. Das Werkstück befindet sich im Abstand ca. 20–50 cm von der Verdampferquelle. Am Werkstückträger liegt eine negative Hochspannung von 100 bis 1000 V. Die Stromdichte beträgt ca. 0.5 mA/cm<sup>2</sup>. Der Gasdruck von einigen Pa bewirkt Streuungen von Dampfpartikeln, so daß beliebige Formen beschichtet werden können.

Eine Variante des Ionenbeschichtens zeigt Fig. 3, bei dem die Verdampfung mittels Lichtbogen erfolgt. Dazu sind in Fig. 3 innerhalb der Vakuumkammer 1 Verdampferquellen 13 angeordnet, die üblicherweise als Kathode geschaltet sind. Die über die Oberfläche der Verdampfungsquelle 13 laufenden elektrischen Lichtbögen haben eine Stromstärke von ca. 60–400 A bei etwa 20 V. An den Fußpunkten der Bögen kommt es zur lokalen Überhitzung und damit einer Verdampfung des Beschichtungsmaterials.

Ein großer Teil des Dampfes, etwa 90%, ist ionisiert und hat eine hohe Anfangsenergie von ca. einigen 10 eV. Der Ionenanteil wird durch die mit negativer Vorspannung beaufschlagten Werkstücke 5, die also als Kathode geschaltet sind, noch zusätzlich auf diese zubeschleunigt. Die Beschichtung wird gewöhnlich bei einem Druck von einigen Pa durchgeführt. Auch hier kann mit der Impulsspannungsquelle 9 die Beschleunigung der Ionen in großem Umfang beeinflußt werden.

Vorteilhaft beim Sputtern ist die Erhöhung der Plasmadichte über der Quelle mit Hilfe eines magnetischen

Feldes. Dieses wird erzeugt durch das sog. Magnetron, z.B. ein Planar-Magnetron. Erreicht wird diese hohe Plasmadichte durch eine spezielle Anordnung eines elektrischen und eines magnetischen Feldes über dem Werkstückträger hoher Leistung. Das Magnetfeld bildet dabei einen geschlossenen halbtorusförmigen Schlauch und, da die Feldlinien an der Targetoberfläche aus- und eintreten, eine Elektronenquelle. Außerhalb dieses Schlauches werden Elektronen auf zyklischen Bahnen beschleunigt, wodurch ihr wirksamer Ionisierungsweg wesentlich verlängert wird. Der Raum, in dem die Ionisation stattfindet, ist direkt bei dem Target und bewirkt so die hohe Plasmadichte. Infolge der negativen Vorspannung des Targets werden aus dem Plasma Ionen gegen das Teil beschleunigt, welche dieses zerstäuben. Auch hier erleichtert die gepulste Zufuhr von Energie in das elektrische und in das magnetische Feld die Steuerung des Beschichtungsprozesses und erhöht die Aufdampfraten.

Allen in Fig. 1–3 beschriebenen Verfahren ist gemeinsam, daß in ihnen eine Glimmentladung stattfindet. Die Kennlinie einer solchen Glimmentladung ist in Fig. 4 dargestellt. Die Abszisse 14 kennzeichnet dabei die Stromdichte und die Ordinate 15 die Spannung. Der Graph 16 gliedert sich in 7 deutlich unterscheidbare Bereiche, die fortlaufend mit den Ziffern 17–23 gekennzeichnet sind. Das Verfahren nutzt dabei den mit 21 gekennzeichneten Bereich der anomalen Glimmentladung, der sich durch höhere Stromdichte und höhere Spannung von dem mit 20 bezeichneten Bereich der normalen Glimmentladung unterscheidet. Die übliche Lichtbogenentladung findet im Bereich 23 statt. Durch die im Bereich 21 vorhandenen hohen Spannungen wie auch hohen Stromdichten ist der Energiefluß des Plasmas besonders intensiv.

Durch den, den Plasmazustand erhaltenen Stromfluß, wandern die positiven Ionen zur negativen Kathode und die Elektronen in umgekehrter Richtung. Der Stromfluß durch das Plasma belastet aber auch stark die zu beschichtenden Werkstücke. Da zur Aufrechterhaltung des Plasmas eine Mindestspannung erforderlich ist, erfahren die Ionen auch eine Beschleunigung, die bei bekannten Verfahren zu einem teilweisen Zerstäuben der aufgetragenen Schichten führt.

Fig. 5 zeigt dagegen die Leistungscharakteristik eines Plasmas nach dem erfindungsgemäßen Verfahren, die eine wesentlich schonendere Beschichtung von Werkstücken ermöglicht. Überraschenderweise erhält die erfindungsgemäße Leistungscharakteristik die physikalischen Bedingungen für die anomale Glimmentladung in der Ofenatmosphäre aufrecht. Die Temperaturbelastung des Substrats beim Beschichten wird erstaunlich gering gehalten bzw. innerhalb genau kontrollierbarer Grenzen gehalten.

Es bildet sich eine vorteilhaft gleichmäßige Temperaturverteilung im Reaktionsraum aus. Die Entstehung von Lichtbögen wird darüberhinaus durch das erfindungsgemäße Verfahren wesentlich vermindert.

Da nur eine sehr geringe Bandbreite innerhalb des Bereichs der anomalen Glimmentladung genutzt werden kann, welche sich noch weiter bei höheren Verfahrensdrücken innerhalb der Vakuumkammer verkleinert, bereitet das Beschichten unterschiedlicher Werkstücke in einem Arbeitsgang besondere Schwierigkeiten. Es besteht insbesondere die Gefahr, daß kleine Teile mit einem großen Oberflächen/Volumen-Verhältnis leicht überhitzt werden. Andererseits kann auch der Energiefluß durch das Plasma nicht beliebig niedrig eingestellt

werden, da sonst das Plasma zusammenbricht.

Erfindungsgemäß wird die Leistung pulswise von einer Pulsspannungsquelle in das Plasma eingebracht. In Fig. 5 besitzen die einzelnen Spannungspulse 24 eine Spitzenspannung 25, die den Bedingungen für die anomale Glimmentladung im Bereich 21 der Fig. 4 gerecht werden. Üblicherweise ist die Dauer 26 des Spannungsimpulses 24 ca. 10  $\mu$ s. In Fig. 5 bezeichnet die Abszisse 27 die Zeitachse, während die Ordinate 28 die Leistung darstellt. Die Leistung der einzelnen Impulse 24 kann zwischen einer minimalen Leistung  $p_{min}$  und einer maximalen Leistung  $p_{max}$  variiert werden. Diese Leistungswerte entsprechend den beiden Endpunkten des Bereiches 21 der anomalen Glimmentladung aus Fig. 4. Die Höhe des Leistungsimpulses 25 entspricht der erforderlichen Leistung des Plasmas  $p_{pla}$ . Die Höhe  $p_{temp}$  entspricht der erforderlichen Leistung zur Aufrechterhaltung der Temperatur im Reaktionsraum. Dieser Energieeintrag, repräsentiert durch die Fläche 29, entspricht der Gesamtfläche der einzelnen Impulse 24. Gegenüber einer Gleichspannungsversorgung repräsentiert die Fläche 29 eine wesentlich geringere Energie. Durch Variation der Pausen zwischen den Impulsen kann der Energieeintrag in überraschend weiten Bereichen geändert werden. Der minimale Energieeintrag dient nicht zur Aufrechterhaltung des Plasmas sondern zur Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Temperatur. Um eine gleichmäßige Temperatur innerhalb der Anlage zu erreichen, muß der Energieeintrag  $p_{temp}$  mindestens so hoch sein, wie der Betrag der Wärmeverluste der Anlage.

Fig. 5 zeigt als ideale Pulsform den Rechteckimpuls, wobei die Versorgungsleistung möglichst kurzfristig von Null auf den erforderlichen Wert ansteigt und genauso abrupt abfällt. Die Pulsdauer ist kleiner als 100  $\mu$ s gewählt. Überraschenderweise bilden sich innerhalb dieser Zeitdauer auch wesentlich seltener Lichtbögen. Die Dauer der Pause zwischen zwei Impulsen ist so kurz gewählt, daß sie typischerweise kleiner als einige 100  $\mu$ s ist. Trotzdem zündet die Glimmentladung leicht beim nächsten Impuls.

Das Verhältnis zwischen Pulsdauer zu Pausendauer kann in der Anlage in weiten Bereichen verändert werden, so daß man teilweise vollständig auf eine Kühlung der Kammerwandung verzichten kann und sogar zu einer Fremdbeheizung der Kammerwandung übergehen kann. Dies macht sich dann in einer besseren Temperaturverteilung innerhalb der Charge bemerkbar.

Fig. 6 zeigt in der oberen Hälfte links der strichpunktierten Linie schematisch einen Ofen mit kalter Wandung 30 und rechts davon einen isolierten Ofen, also mit heißer Wandung 31. Auf dem Werkstückträger 5 sind vertikal verschiedene zu beschichtende Werkstücke 32 angeordnet. Den Ofenwandungen entsprechend bilden sich auch unterschiedliche Temperaturprofile aus. Der Graph des Temperaturprofils bei heißer Wandung ist mit 33 und der bei kalter Wandung mit 34 bezeichnet. Die Ordinate dabei ist mit temp. bezeichnet. Fig. 6 zeigt damit die Temperaturverteilung innerhalb des Ofens über dem als Abszisse dargestellten Ort. Deutlich ist das wesentlich gleichmäßigere Temperaturprofil 33 erkennbar, bei dem die Temperatur erst innerhalb der Isolation von der Ofentemperatur nach außen zur Umgebungstemperatur abfällt.

Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich deshalb durch einen wesentlich verringerten Ausschuß aus. Es läßt sich darüberhinaus auch in weiten Grenzen steuern, so daß es sich zur Automatisierung anbietet. Außer-

dem weist es auch geringere Betriebskosten auf. Trotzdem werden höhere Beschichtungsleistungen ermöglicht, da die Belastung des Substrates durch den Ionenbeschuß geringer ist und deshalb weniger Teilchen aus dem Substrat bzw. aus der Beschichtung wieder herausgeschlagen werden. 5

Hierzu 3 Blatt Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

BEST AVAILABLE COPY

40

45

50

55

60

65

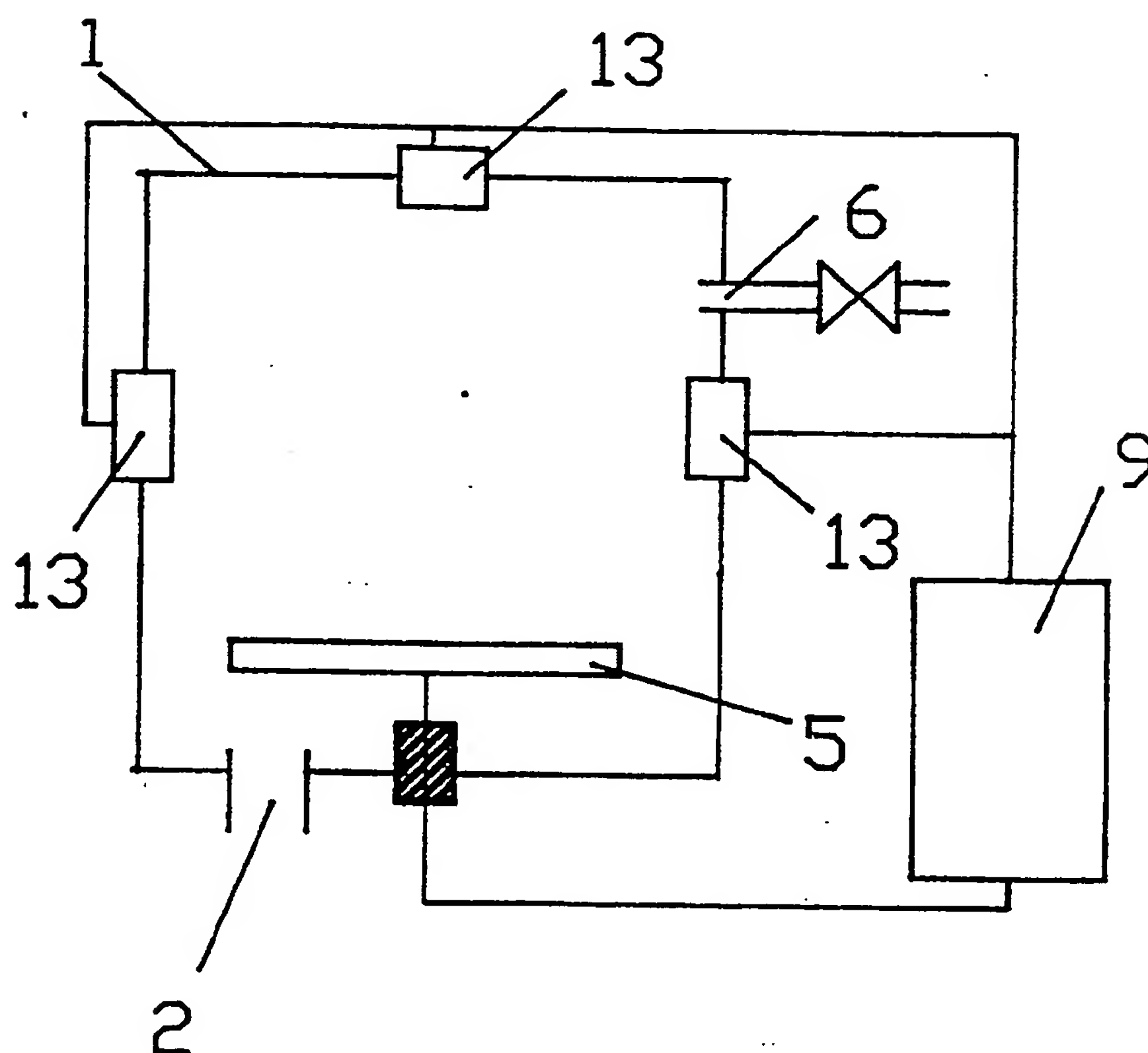


Fig. 3

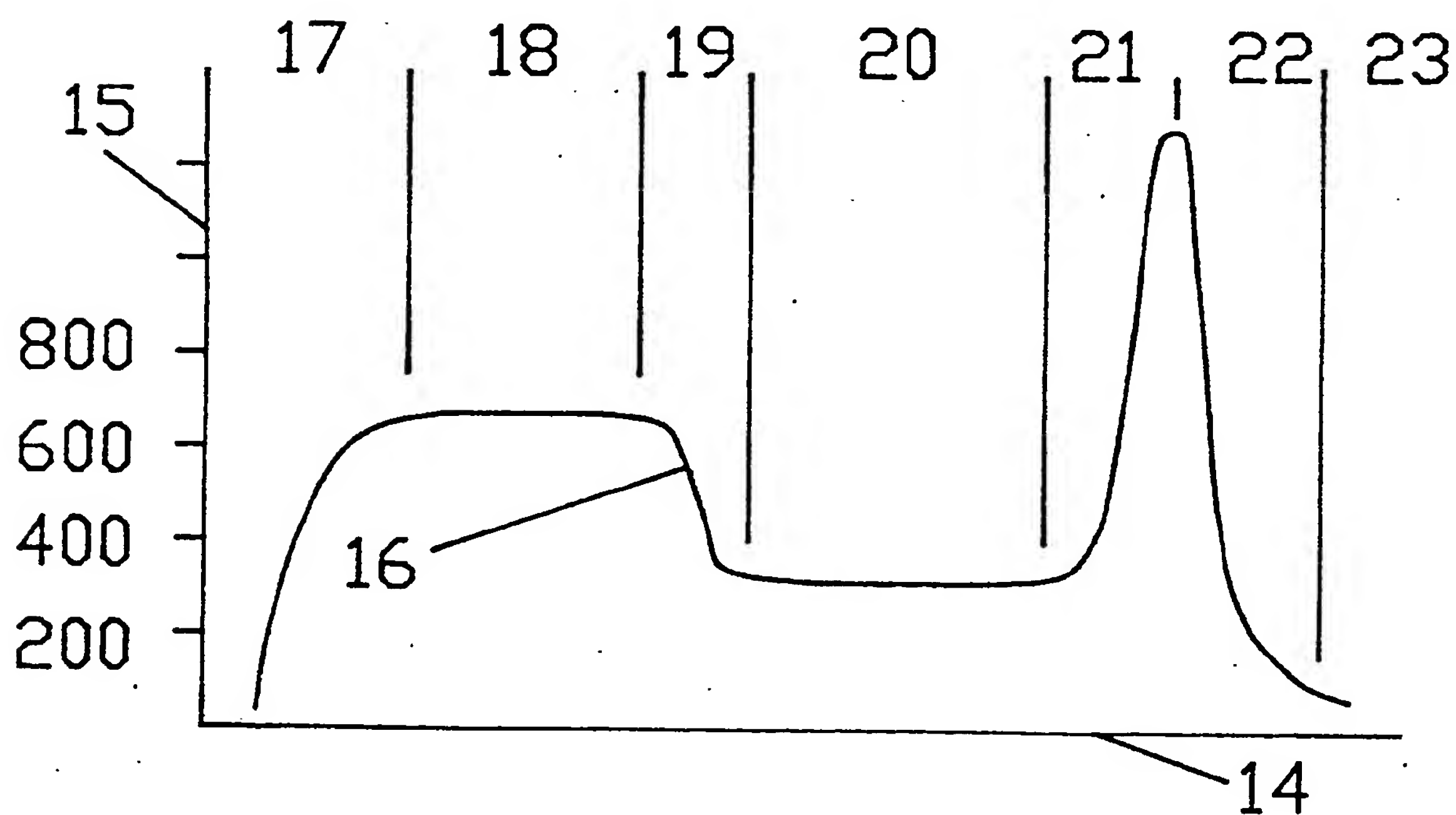


Fig. 4



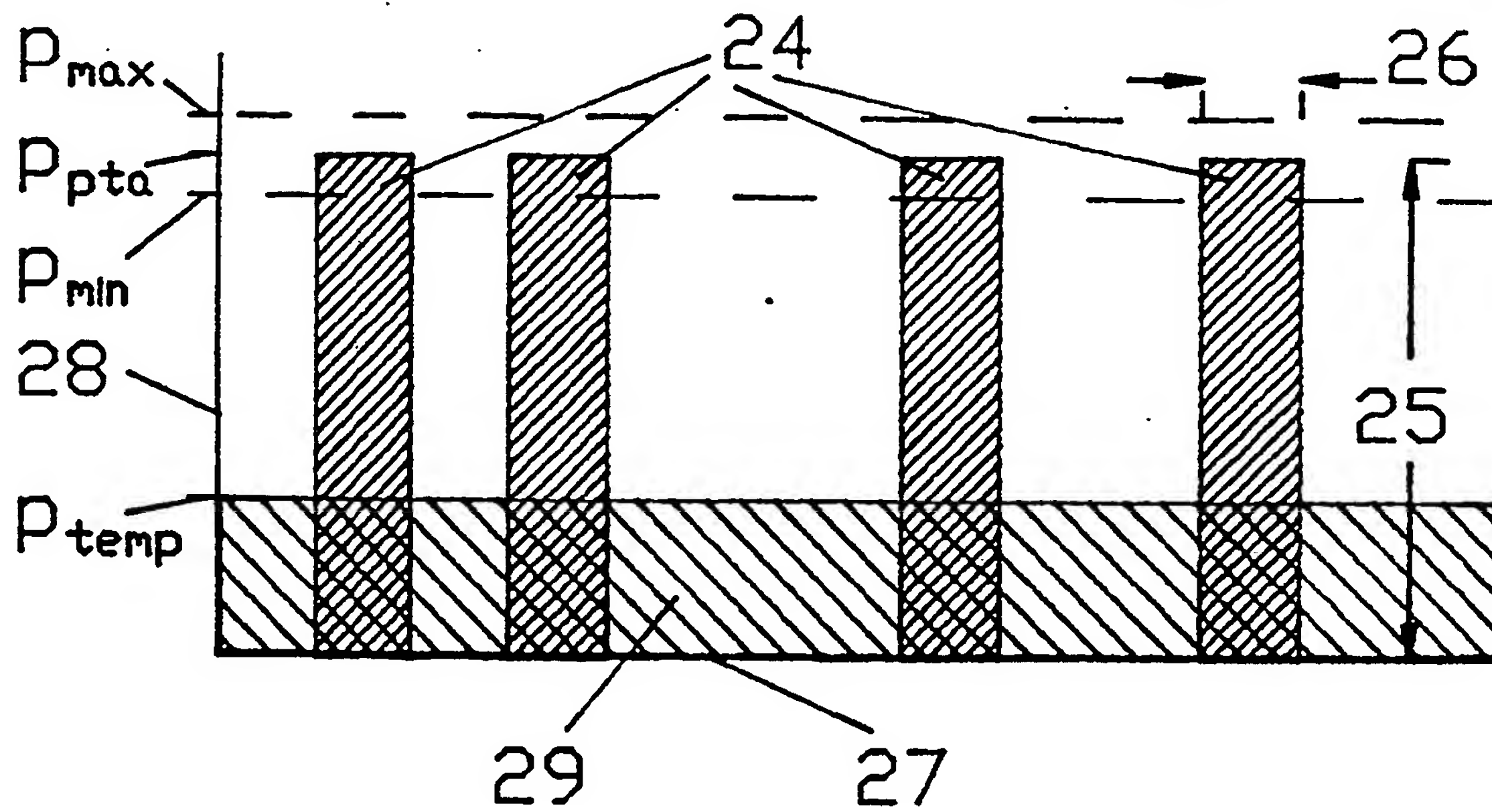


Fig. 5

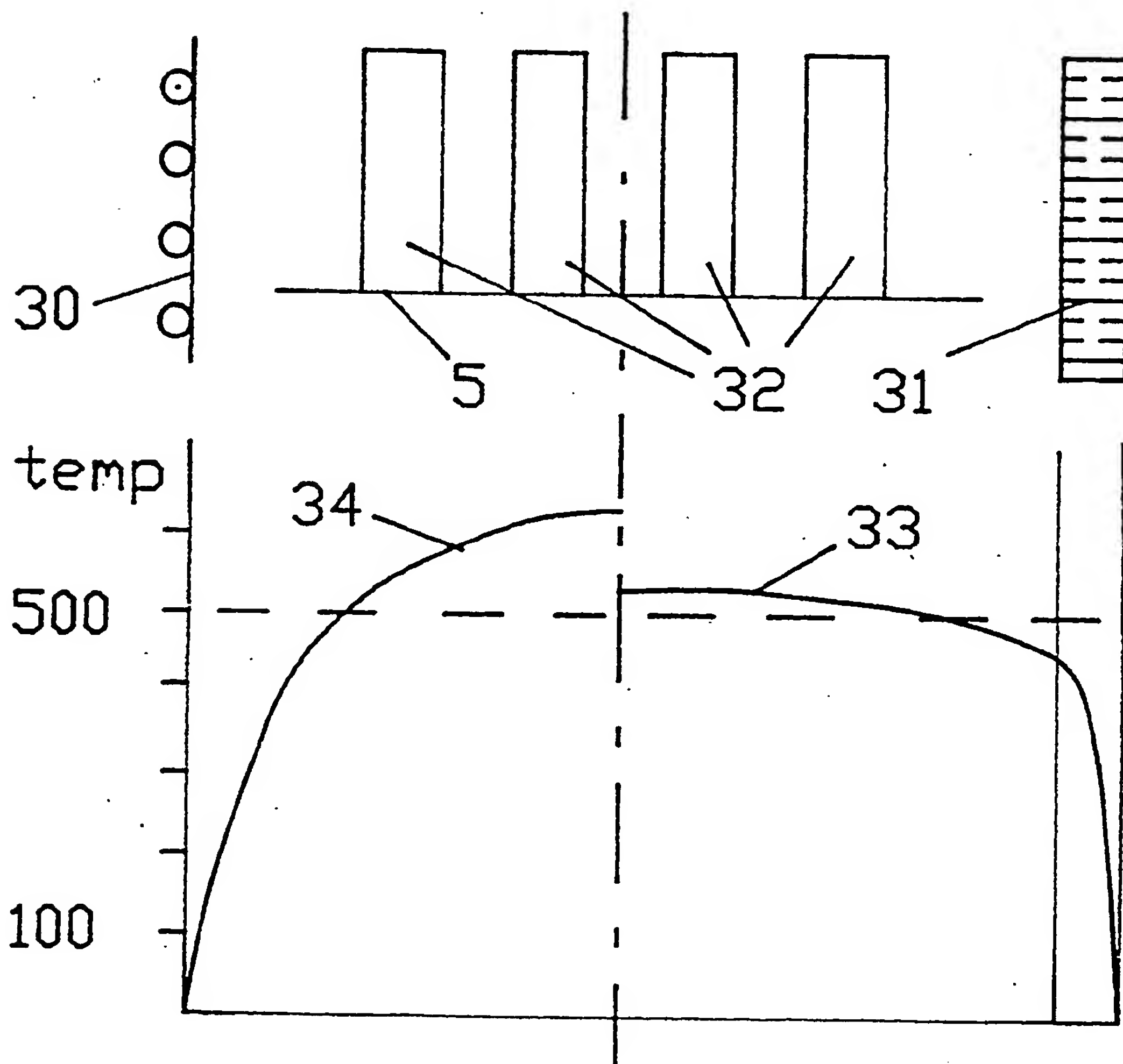


Fig. 6



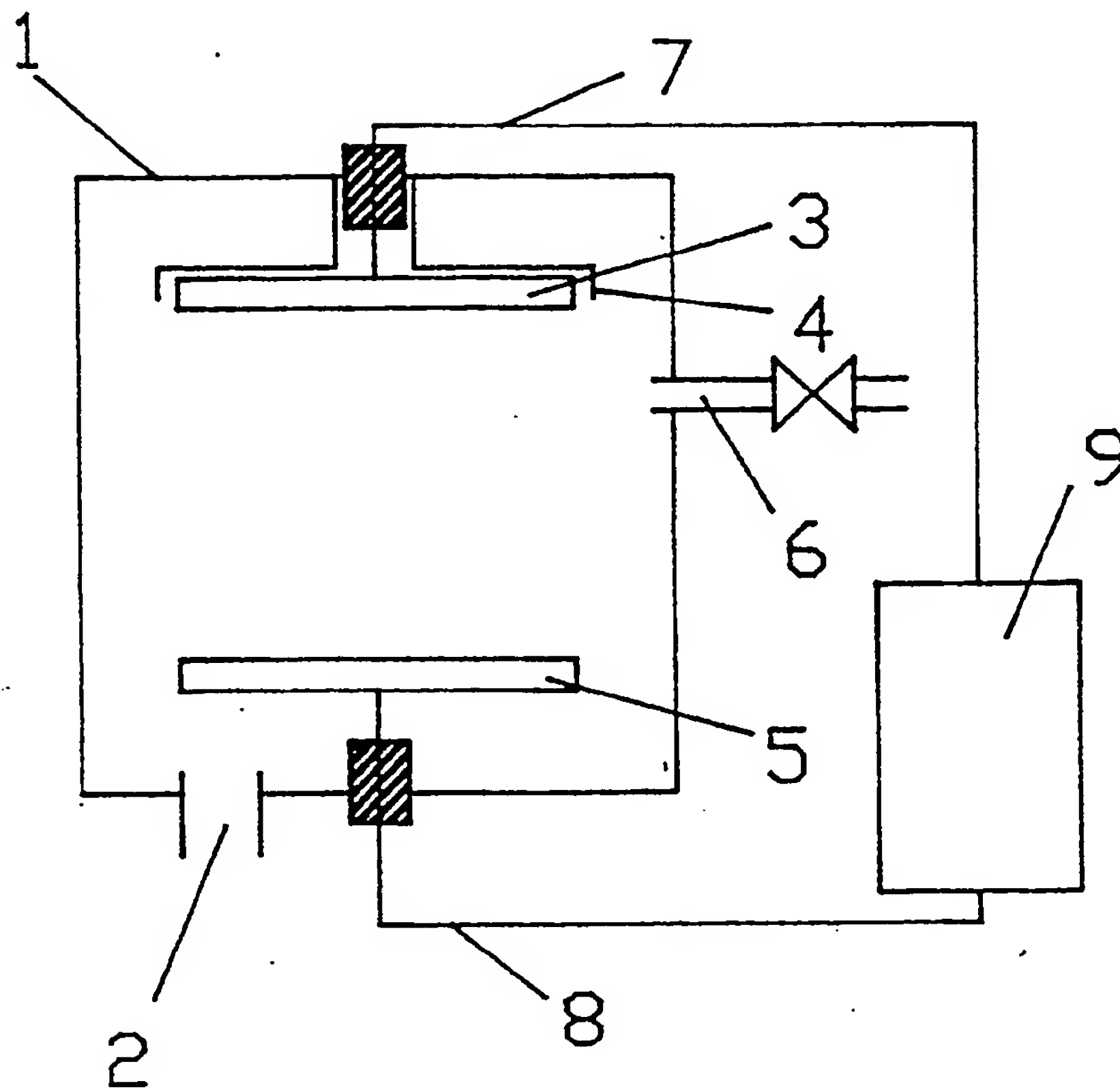


Fig. 1

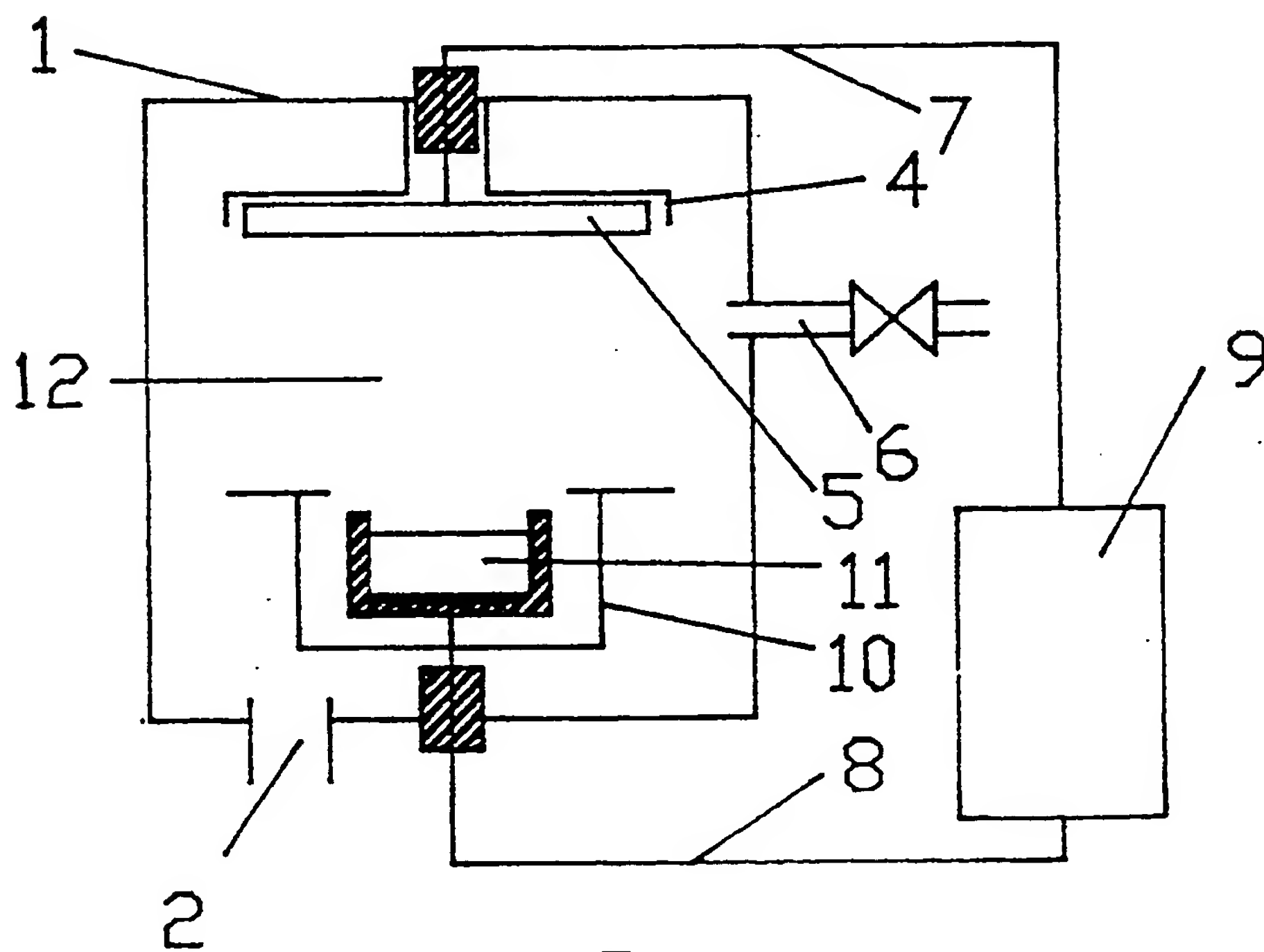


Fig. 2